

Efecto de la implosión de burbujas sobre el desgaste por cavitación de bombas centrífugas que trasiegan fluidos amoniacaes

Bubbles implosion effect on cavitation wear of centrifugal pumps that transfer ammoniacal fluids

Jorge Luis Reyes-Cruz^{1*}, Tomás Fernández-Columbié¹, Isnel Rodríguez-González¹, Gerardo Ruíz-Chavarría², Sergio Hernández-Zapata²

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

²Universidad Nacional Autónoma de México, México.

*Autor para la correspondencia: jreyes@ismm.edu.cu

Resumen

En bombas centrífugas que trasiegan licores industriales amoniacaes los daños por cavitación se acentúan debido a la composición de este fluido. Este artículo expone el efecto que sobre los álabes produce la implosión de burbujas en el licor producto de la lixiviación carbonato-amoniacaal (mezcla de agua, amoníaco y partículas en suspensión) de menas lateríticas ferroniquelíferas. A la luz de resultados previos que establecen una relación entre el tamaño de las burbujas y la concentración de amoníaco del licor, se analizó la microestructura de un álabe de acero Hastelloy C 276 afectado por la cavitación. Se obtuvo que en la zona inicial del álabe las afectaciones son menores que hacia las partes distales, donde llegan a producirse perforaciones completas en el metal, lo cual se asocia a que a concentración de 34 % de amoníaco en el licor las burbujas desarrollan gran tamaño e implosionan a la salida del álabe produciendo ondas de presión más intensas que las que generan las burbujas que se forman a 27 % y que implosionan en la zona más cercana al eje del impelente. Se concluye que los cambios microestructurales en material del álabe guardan estrecha relación con la concentración de amoníaco en el licor, siendo las grietas, picaduras y cavidades de mayores dimensiones cuando la concentración de amoníaco es máxima (34 %).

Palabras clave: desgaste por cavitación; bomba centrífuga; implosión de burbujas; licor amoniacal; análisis microestructural; Hastelloy C 276.

Abstract

This article exposes the effect bubbles implosion causes on buckets on the liquor from carbonate-ammonia leaching (mixture of water, ammonia and particles in suspension) of ferronickel lateritic ores. Based on the previous results that establish a relationship between the bubbles' size and the ammonia concentration of the liquor, the microstructure of a Hastelloy C 276 steel blade affected by cavitation was analyzed. It was also obtained that affectations are smaller in the initial area of the bucket than the distal parts, where complete perforations can be produced in the metal, what is associated to the fact that bubbles develop a great size at a concentration of 34% of ammonia in the liquor and implode at the exit of the bucket producing more intense pressure waves than those generated by the bubbles formed at 27% and that implode in the initial zone. It is concluded that the microstructural changes in the bucket material are closely related to the concentration of ammonia in the liquor making pitting, cracks, and cavities larger when the concentration of ammonia is maximum (34%).

Keywords: cavitation wear; centrifugal pump; bubble implosion; ammonia liquor; microstructural analysis; Hastelloy C 276.

1. INTRODUCCIÓN

La cavitación es el efecto hidrodinámico que se produce cuando un fluido (agua o cualquier otro) pasa a gran velocidad por una arista afilada, donde se produce una descompresión del fluido (Reyes-Cruz 2015). El término cavitación alude a la formación dentro de un fluido de "cavidades" o burbujas las que, al viajar a zonas de mayor presión, colapsan cuando el vapor regresa al estado líquido de manera súbita; ello produce un brusco aplastamiento de las burbujas y el arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno (Dopazo 2008).

La formación e implosión de burbujas es una manifestación ampliamente estudiada en fluidos como el agua, sin embargo, en las pulpas y licores de procesos industriales el efecto de la cavitación no ha sido suficientemente comprendido.

De manera general, la evolución de burbujas en el interior de una bomba centrífuga es descrita por la ecuación de Rayleigh-Plesset (Ramírez, Jácome y Giraldo 2013), debido a que el fenómeno de cavitación está asociado al

efecto de formación de las burbujas, comportándose como un proceso dinámico que consta de crecimiento, decrecimiento y colapso (Pérez 2004).

Existen modelos de cavitación que parten de la relación existente entre el crecimiento de una burbuja típica en el fluido y la evolución del tamaño de las mismas. Cuando la presión en el interior de la burbuja y la presión de vapor del fluido igualan sus valores, las burbujas alcanzan el radio máximo, entonces ocurre el colapso mediante las oscilaciones que se presentan en el radio (Haoulo, García y Soto 2005).

El proceso metalúrgico Caron (1950) emplea licor amoniacal, el cual es una mezcla de agua, amoníaco y sólidos en suspensión que se transporta por medio de bombas centrífugas a temperaturas desde 20 °C hasta 64 °C. Esta mezcla, según el principio de Gibbs, puede expresarse como una función de dos variables: la temperatura de saturación y la concentración, existiendo un único valor de presión de saturación para cada valor de concentración.

Estudios experimentales previos con licor amoniacal han establecido el comportamiento dinámico de la formación de burbujas en bombas centrífugas en régimen cavitacional, así como los radios máximos de las burbujas que se forman a concentraciones específicas de 27 % y 34 % de amoníaco. Los valores de la presión de saturación del licor amoniacal obtenidos a estas concentraciones han permitido establecer que la formación de burbujas en el licor amoniacal ocurre de manera más rápida que en el agua y que en la medida que aumenta la concentración de amoníaco en el licor también lo hace el radio de las burbujas (Reyes-Cruz 2016).

De igual modo se constata que las burbujas de mayores radios viajan durante más tiempo por la arista del álabe y, por consiguiente, su implosión tiene lugar hacia las partes distales de este elemento del impelente.

El presente estudio se enfoca en determinar, a nivel microestructural, el efecto de la cavitación sobre los álabes del impelente en relación con el radio de las burbujas, el cual varía en función de la concentración de amoníaco (27 % y 34 %) en el licor producto de la lixiviación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preparación de muestras

Se analizó un impelente fabricado de Hastelloy C 276 de una bomba centrífuga retirada del servicio por afectaciones de la cavitación. El Hastelloy C 276 es una superaleación de base níquel resistente a la erosión

y corrosión que ha demostrado ser el mejor material para la fabricación de impelentes de bombas centrífugas (Romo-Arango 2014).

Para este estudio se cortó un fragmento del impelente (Figura 1) y se seccionó en ocho muestras de 15 mm x 15 mm (Figura 2), utilizando una fresa de disco del tipo HSS P 18 y abundante refrigeración para evitar el calentamiento y cualquier cambio en la microestructura. La muestra 1 corresponde a la parte posterior del impelente no expuesta al fluido, y de la 2 a la 8 consecutivamente van desde la parte inicial del álabe hasta su extremo exterior.



Figura 1. Impelente afectado del cual se tomó una sección para el análisis microestructural.

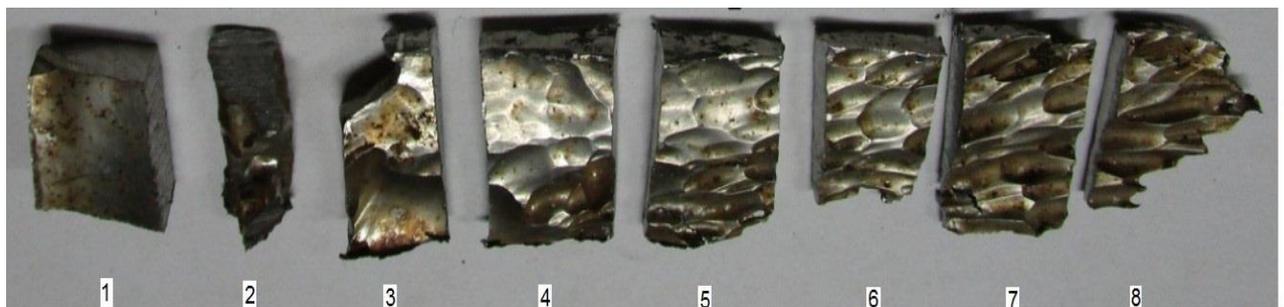


Figura 2. Secuencia de las muestras.

La preparación metalográfica de las muestras para el análisis microestructural incluyó operaciones de corte, desbaste, pulido, desengrasado y lavado. Estas fueron desbastadas con papeles abrasivos (hasta P2000) y pulidas en una pulidora, la que posee un paño de fieltro y a la que se le acompaña con una suspensión de alúmina de 0,1 μm .

Para el ataque químico se empleó agua regia, luego las muestras se lavaron con agua destilada, se sumergieron en alcohol etílico durante diez segundos y, finalmente, se les eliminó la humedad en un secador neumático.

2.2. Análisis químico

En la Tabla 1 se muestra la composición química estándar de la aleación empleada obtenida en un espectrómetro de emisión óptica.

Tabla 1. Composición química (en %) de la aleación Hastelloy C 276

Mo	Cr	Fe	Co	Ni	
15,0-17,0	14,5-16,5	4,0-7,0	3,0-4,5	2,5 máx	
Mn	C	V	P	S	Si
1,0 máx	0,01 máx	0,35 máx	0,04 máx	0,03 máx	0,08 máx

Se empleó un espectrómetro de emisión óptica BAIRD, modelo DV-4, con un error del 5 %, ubicado en el laboratorio de materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), normalizado según ASTM E-485 para corroborar la composición química del Hastelloy C 276 del fragmento extraído del impelente.

2.3. Análisis microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 con una cámara instalada al hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas se nivelaron en un dispositivo con plastilina. En la Figura 3 aparece la estructura patrón del material de los álabes de la bomba centrífuga.

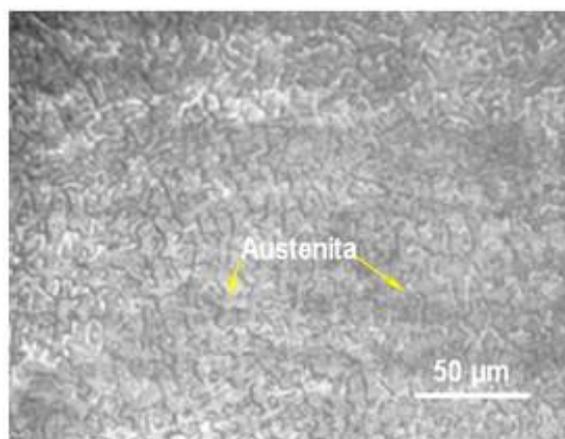


Figura 3. Microestructura de la muestra patrón de la aleación Hastelloy C 276.

La micrografía de la muestra patrón exhibe una estructura compuesta por granos austeníticos en toda su matriz; se distinguen las líneas de los límites de los granos, sitio donde la fractura progresa alrededor de los carburos secundarios y por los bordes de los granos, los cuales son perjudiciales para la tenacidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Composición química

El análisis químico corroboró la correspondencia en los contenidos de los diferentes elementos entre la muestra patrón y el material del impelente. Los porcentajes de Mo, Cr y Ni avalan que el material del impelente es la superaleación base níquel Hastelloy C 276 (Tabla 2).

Tabla 2. Composición química (en %) del material del impelente

Mo	Cr	Fe	W	Co	Mn	C	V	Ni
15,0	16,0	4,0	3,8	2,5	0,9	0,01	0,35	Balance

3.2. Daños a la microestructura

La Figura 4 muestra el efecto de la cavitación a nivel microestructural, donde puede observarse que la afectación tiene lugar tanto en los límites de granos, como en el interior de estos; tal como se observa en la figura no todos los límites de granos ni todos los granos se desgastan por igual.

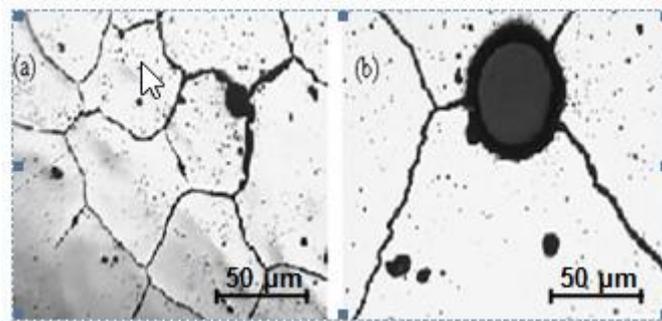


Figura 4. Afectación microestructural de los álabes. a) daño a nivel del grano en muestra 5; b) daño a nivel del límite de los granos en muestra 6.

Entre los factores a considerar en la formación de cavidades en la aleación austenítica se encuentran el amoníaco, las partículas suspendidas y los iones cloruros, así como las altas temperaturas de la pulpa. Esta diversidad de agentes ocasiona una gran complejidad al proceso de deterioro de las bombas centrífugas.

Luego de un tiempo en el que la aleación Hastelloy C 276 ha estado sometida a un régimen de trabajo severo, expuesta a la proyección de partículas suspendidas, la influencia de los iones cloruros y presiones de vapor, la red cristalina se daña y en los bordes de granos tiene lugar la corrosión intercrystalina.

Este comportamiento, también reportado por Mesa, Garzón y Tschiptschin (2010) para aceros austeníticos de alto nitrógeno, está asociado a que las

tensiones provenientes de la implosión de burbujas de cavitación actúan de forma independiente, ya que se observan granos completamente dañados y granos con su superficie bastante conservada. Tal fenómeno se reporta igualmente a nivel superficial en películas metálicas delgadas (Torres 2010).

Considerando la composición multifásica del licor producto de la lixiviación es indudable que los daños en la microestructura del álabe involucren procesos como la corrosión y el desgaste por erosión, los cuales son potenciados, además, por la acción de las ondas de presión que ocasionan las burbujas al implotar.

3.3. Corrosión por picaduras

La Figura 5 muestra imágenes de picaduras en la microestructura del álabe. Estas constituyen concentradores de esfuerzos para la generación y propagación de grietas. Alcántara, Fernández y Rodríguez (2016), al estudiar las afectaciones en las volutas, atribuyen la formación de grietas a la existencia de defectos durante el proceso de elaboración mecánica o a las tensiones de contacto que producen fatiga de las capas superficiales. Sin embargo, este elemento no es afectado de igual modo por la formación de burbujas que los álaves.

Se observa que regiones que todavía no fueron afectadas por la fractura continúan deteriorándose por deformación plástica, donde la formación de picaduras y microgrietas llevan a la superficie a un estado tal de deformación, que los esfuerzos repetidos provenientes de la implosión de burbujas de vapor y formados durante el proceso de cavitación provocan fácilmente la remoción de material. El cambio de mecanismo de desgaste, de deformación plástica para desgaste por fractura, provoca pérdida de masa a través del desprendimiento de partículas de desgaste de la superficie, conocidas como "*debris*". Guitar, Duarte y Montero (2003) refieren que la pérdida de material es causada por la acción de los campos de esfuerzos de tipo cortante provenientes de la implosión de burbujas de cavitación.

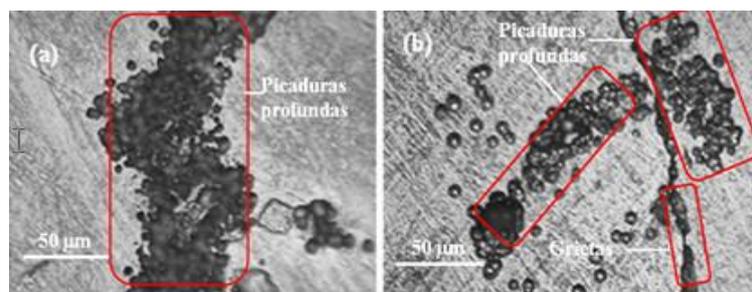


Figura 5. Comportamiento de la corrosión por picaduras en el álabe. a) muestra 3; b) muestra 4.

Este tipo de picaduras aparece cuando la capa pasiva se rompe localmente. Los responsables de esta rotura son los iones cloruros que, al estar acompañados por un electrolito, le retiran, al acero inoxidable, los átomos de cromo necesarios para la creación de la mencionada capa pasiva; entonces aparecen las pequeñas picaduras. Lo, Shek y Lai (2009) atribuyen a la existencia de residuos, óxidos ajenos, escorias o azulamiento del acero el reforzamiento de la corrosión por picaduras.

A pesar de que la aleación Hastelloy C 276 está considerada como una aleación de excelente resistencia a la corrosión, a la picadura y al agrietamiento por tensión de corrosión debido a su alto contenido de níquel y de molibdeno, hay que destacar que, en las condiciones de transporte del licor producto de la lixiviación, los tres elementos que componen este fluido (amoníaco, agua y sólidos en suspensión) provocan en la película pasiva una discontinuidad en su estructura que los hace susceptible a la corrosión.

3.4. Desgaste erosivo

El flujo de vapor que contiene partículas sólidas es responsable por problemas de erosión de los componentes de bombas centrífugas y de la reducción de su vida útil. La contaminación del vapor es un problema típico del transporte del fluido en las industrias del níquel. Las partículas duras, así como el agua, inducen el daño que puede ocurrir en los sistemas de álabes, ya que impactan directamente en el sistema de la bomba y causa su desgaste. La Figura 6 muestra las micrografías representativas del desgaste erosivo.

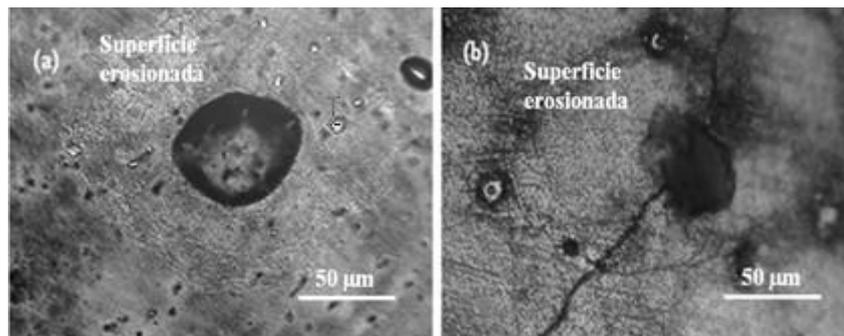


Figura 6. Comportamiento del desgaste erosivo en el álabe. a) muestra 7; b) muestra 8.

3.5. Efectos de la implosión de burbujas

Los defectos microestructurales que se observan en la Figura 7 evidenciaron que las cavidades en las muestras de la parte inicial del álabe son menores y más localizadas, no perforan completamente el metal.

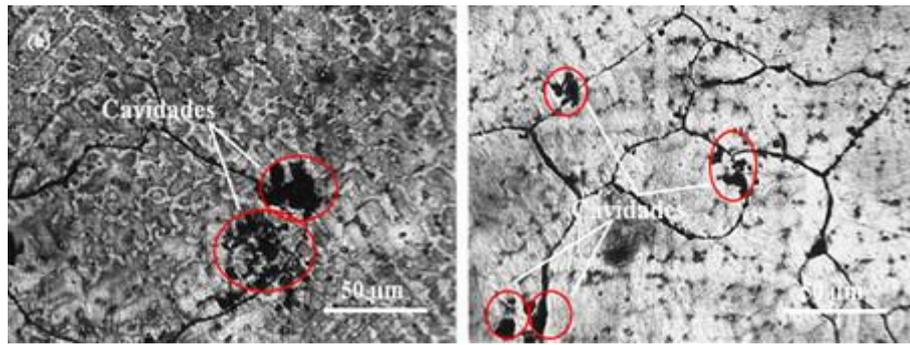


Figura 7. Daños microestructurales provocados por las burbujas en la parte inicial del álabe. a) muestra 3; b) muestra 4.

Hacia el extremo del impelente se observan daños más severos que afectan mayores áreas, llegando a formar perforaciones totales que atraviesan el material del álabe (Figura 8).

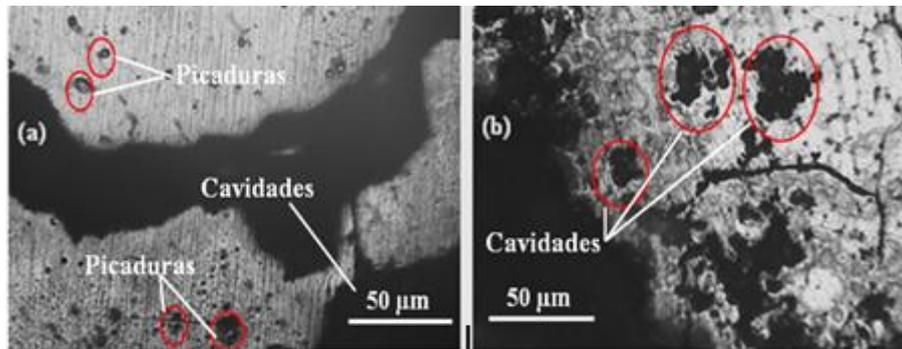


Figura 8. Daños microestructurales provocados por las burbujas hacia la parte final del álabe. a) muestra 7; b) muestra 8.

Este hallazgo guarda relación estrecha con el tamaño que desarrollan las burbujas a diferentes concentraciones de amoníaco, de tal modo que a los valores de 27 % de concentración de amoníaco (valor mínimo controlado en el proceso industrial) se forman burbujas más pequeñas, cuya trayectoria en el perfil del álabe solo alcanza la parte inicial, e implosionan en esa zona. Al ser menor la energía de la implosión de estas burbujas ocasiona menores daños al metal, lo cual se evidencia en la Figura 2 (muestras 3, 4 y 5) donde puede observarse que los desprendimientos del metal ocurren más superficialmente y con menor intensidad.

Contrariamente, a concentraciones de 34 % de amoníaco los radios de las burbujas son mayores y alcanzan casi el doble de tamaño que a 27 %. Estas burbujas recorren mayores distancias sobre el perfil de álabe e implosionan en su zona más externa, ocasionando incluso perforaciones totales. La Figura 2 evidencia que en las muestras 6, 7 y 8 la profundidad de los desprendimientos del metal es mucho mayor y el espesor del álabe se adelgaza notablemente.

En la práctica estos resultados pueden ser de utilidad a la industria para corregir el manejo de las instalaciones de bombeo y regular las concentraciones de amoníaco a valores óptimos que eviten la cavitación y, por consiguiente, incrementen la durabilidad de los equipos.

4. CONCLUSIONES

- Los cambios microestructurales en el álabe de Hastelloy C 276 de los impelentes de bombas centrífugas en la industria del níquel guardan estrecha relación con la concentración de amoníaco en el licor, siendo las grietas, picaduras y cavidades de mayor dimensión cuando la concentración de amoníaco es máxima (34 %).
- Las mayores afectaciones tienen lugar en la parte terminal del álabe debido a que en esa zona ocurre la implosión de burbujas de mayor tamaño.

5. REFERENCIAS

- Alcántara, D.; Fernández, T. y Rodríguez, I. 2016: Influencia de la pulpa lixiviada sobre el desgaste de una aleación del tipo Hastelloy C 276. *Minería y Geología*, 32(1): 93-105.
- Caron, M. H. 1950: Fundamental and Practical Factors in Ammonia Leaching of Nickel and Cobalt Ores'. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2(1): 67-90.
- Dopazo, G. C. 2008: ¿Cavitar o no cavitar? La inevitable ubicuidad de las burbujas. Discurso leído en la sesión inaugural del año académico 2008 de la Real Academia de Ingeniería de España. Madrid. 50 p.
- Guitar, M.; Duarte, M. y Montero, Y. 2003: Comportamiento frente al desgaste y corrosión de un acero inoxidable AISI 304 nitrurado por plasma. In: Actas de las Jornadas SAM / Congreso CONAMET / Simposio Materia. Bariloche, Argentina, 17-21 noviembre, p. 722-725.
- Haoulo, M.; García, F. y Soto, J. 2005: Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*, 20(4): 102-113.
- Lo, K.; Shek, C. y Lai, J. 2009: Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering*, 65(12): 39-54.
- Mesa, D.; Garzón, C. y Tschiptschin, C. 2010: Estudio del desgaste erosivo por cavitación de un acero austenítico de alto nitrógeno apoyado en el uso de la difracción de electrones retroproyectados-EBSD. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 18(2): 235-242.
- Pérez, R. 2004: Cavitación y Materiales de Construcción en las Bombas Centrífugas. *Minería y Geología*, 20(3-4): 114-118.

- Ramírez, R.; Jácome, M. y Giraldo, A. 2013: Solución de la ecuación de Rayleigh-Plesset por medio del método del elemento finito. *Ingeniería y Ciencia*, 10(2): 23-31.
- Reyes-Cruz, J. 2015: Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. *Minería y Geología*, 31(1): 45-54.
- Reyes-Cruz, J. 2016: Dinámica de las burbujas de cavitación en fluidos amoniacales trasegados con bombas centrífugas. *Minería y Geología*, 33(3): 128-146.
- Romo-Arango, S. A. 2014: *Evaluación de la resistencia a erosión por cavitación de superficies texturizadas*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, H. S. 2010: *Generación de burbujas de cavitación con láser continuo para la formación de micro agujeros en películas metálicas delgadas*. Tesis doctoral.

Recibido: 12/04/2018

Aceptado: 01/03/2019